

压印光刻中模具空间位姿的识别及仿真

蒋维涛, 丁玉成, 卢秉恒, 刘红忠

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在纳米压印光刻中, 为了减小模具与晶片的平行度误差, 将精对正光栅标记的相对误差校正到半栅距范围之内, 并建立了点光源映射的数学模型, 对模具空间位姿的投影进行图像识别. 在算法设计的基础上, 建立了纳米压印光刻系统中的粗对正系统及其控制流程, 通过仿真计算, 可以将模型的转角计算精度控制在 10^{-6} rad 以下, 位置偏移量计算精度控制在 1 nm 以下, 所建立的粗对正系统的检测精度可达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下, 因此满足了压印光刻中下一步精对正系统的要求.

关键词: 纳米压印; 点光源映射; 粗对正

中图分类号: TH112; TH113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0055-04

Identification and Simulation of Template Spatial Position in Nanoimprint Lithography Process

Jiang Weitao, Ding Yucheng, Lu Bingheng, Liu Hongzhong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In nanoimprint lithography, to reduce the error of parallelism between the template and the substrate, and adjust the relative error between the grating marks for precise alignment to half of the grating distance, a mathematic model for spot lamp-house mapping is established to identify the image of the template projection. Based on the algorithm, a coarse-alignment system and the corresponding control process are designed. Via the simulation, the calculating accuracy for the rotate angle can be controlled below 10^{-6} rad, for offset below 1 nm. Thus the precision of the coarse-alignment system gets below $1\ \mu\text{m}$ to meet the requirement of the next precise alignment.

Keywords: nanoimprint; spot lamp-house; coarse-alignment

在微纳制作领域中, 曝光特征尺寸始终受到光源半波长的限制, 当特征尺寸小于 100 nm 时, 传统的光学光刻会存在着严重的衍射现象, 使得制造精度难以达到要求. 近几年来, 利用机械微复型原理的压印光刻工艺能够复型最小 $6\ \text{nm}$ ^[1] 的特征结构, 这可能成为下一代光刻技术的发展趋势.

晶片不平行, 将得到楔形的留膜(见图 1), 若楔形留膜的厚度差超过压印特征的高度, 在后续工艺中的干法等厚刻蚀中就会将特征刻蚀掉. 在实际压印过程中, 一般通过调整承片台的位姿^[2-4]来改善留膜的均匀性.

本文提出了一种基于点光源映射的粗对正思

1 压印中模具与晶片的平行问题

压印的目的是将模具上的微小特征复型到阻蚀胶上, 并保证均匀、尽可能小的留膜厚度, 若模具与

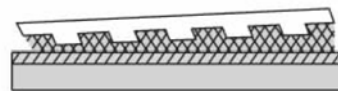


图1 模具倾斜造成的楔形留膜缺陷

路,用于检测模具平面与承片台平面的相对位置,从而为承片台位姿的调整提供了依据。

2 点光源映射的数学模型

2.1 坐标系归一化方程的描述

设坐标系 $o'-x'y'z'$ 在 $o-xyz$ 中的原点坐标为 $o'(p_x, p_y, p_z)$, 其内一点 (x', y', z') 分别绕 z' 、 x' 、 y' 轴的旋转角度为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 则到 $o-xyz$ 的转移矩阵^[4-7]为

$$T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} c_1 c_2 - s_3 s_2 s_1 & -s_3 c_2 - c_3 s_2 s_1 & -s_2 s_1 & p_x \\ s_3 s_1 & c_3 c_1 & -s_1 & p_y \\ c_3 s_2 + c_2 s_1 s_3 & -s_3 s_2 - c_2 s_1 c_3 & c_2 c_1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中:将 c_i 记为 $\cos\theta_i$, s_i 记为 $\sin\theta_i$, $i=1, 2, 3$ 。

2.2 点光源映射的数学建模

如图2所示,模具的实际位置均可由理想位置先绕 z' 轴旋转 θ_1 角度,后绕 x' 轴旋转 θ_2 角度,再平移形成。

设 M' 在 $o'-x'y'z'$ 中的位置向量为 $\mathbf{X}_1$, 经变换形成的 M'_2 在 $o-xyz$ 中为 $\mathbf{X}_2(x_2, y_2, z_2)$, 设点光源为 $P(0, 0, z_0)$, M 的坐标为 $(x', y', 0)$, 则

$$\mathbf{X}_2 = T(\theta_1, \theta_2, 0, p_x, p_y, p_z) \mathbf{X}_1 \quad (1)$$

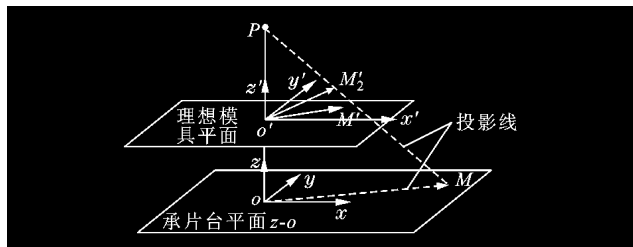
由 $P(0, 0, z_0)$ 、 $M'_2(x_2, y_2, z_2)$ 确定的直线方程

$$x/x_2 = y/y_2 = (z - z_0)/(z_2 - z_0)$$

与 $z=0$ 平面相交于 M 可推导出

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_0 - z_2)/z_0 & 0 \\ 0 & (z_0 - z_2)/z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可解出 θ_1 、 θ_2 , 由 o' 的投影可计算出 p_x 、 p_y 。



P:点光源;M:投影点

图2 点光源映射示意图

3 模具倾斜的校正及仿真

在压印系统中,模具安装在只有 z 向自由度的压印头上,因此模具的定位坐标 p_z 可认为是某一个定值。

3.1 对准标记空间位姿投影模型

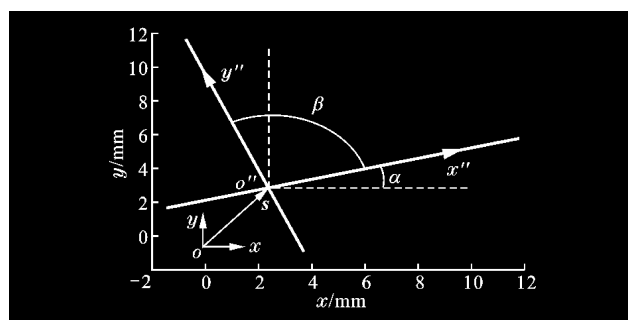
通过对点光源映射模型的分析及大量仿真,可建立标记不同姿态的区别准则。如图3所示,标记 $o'-x'y'z'$ 在投影面 $o-xy$ 中的投影为 $o''-x''y''$ 。

当 o' 、 o 、 P 在同一直线上时, o' 的投影坐标为 o'' 的 $(0, 0, 0)$; 当 o' 、 o 、 P 不在同一直线时, 设 o' 的绝对坐标为 $(1, 1, 50)$, 则 o' 的投影坐标为 $o''(2, 2, 0)$, 如表1所示。

表1 o' 、 o 、 P 共线-不共线时的投影计算

预设值		计算值	
θ_1/rad	θ_2/rad	α/rad	β/rad
0	$\pi/4$	0-0	1.570 8-1.551 2
$\pi/4$	0	0.785 4-0.785 4	1.570 8-1.570 8
$\pi/4$	$\pi/4$	0.615 5-0.618 2	1.231 0-1.249 8

α :标记投影在投影面中的偏转角; β :标记轴夹角的投影。



s:偏移向量

图3 点光源对十字标记的投影

通过大量仿真计算,从表1中可以归纳出如下2个定理。

定理1 当 $\beta=\pi/2$ 时, $\theta_1=\alpha$; 若 o' 、 o 、 P 共线, 则 $\theta_1=0$ 或 $\theta_2=0$; 若 o' 、 o 、 P 不共线, 则 $\theta_2=0$ 。

定理2 当 $\beta\neq\pi/2$ 时, 若 o' 、 o 、 P 不共线, 则 $\theta_2\neq 0$; 否则, $\theta_1\neq 0$, $\theta_2\neq 0$ 。

3.2 投影归类算法的设计

(1)由定理1和定理2可知,当 o' 、 o 、 P 共线, 即 $p_x=p_y=0$ 时, 若

$$\beta=\pi/2, \alpha\neq 0, \text{ 则 } \theta_1=\alpha, \theta_2=0 \quad (3)$$

若 $\beta=\pi/2, \alpha=0$, 则 $\theta_1=\alpha=0$, 在 $o'-x'y'z'$ 中取 $M'_1(0, 1, 0)$ 和 $M'_2(0, -1, 0)$ 点, 在 $o-xyz$ 中投影坐标为 $M_1(x_1, y_1, 0)$ 和 $M_2(x_2, y_2, 0)$, 令 $k_1=y_1/y_2$, 可得

$$\theta_2 = \arcsin\left[\frac{k_1+1}{k_1-1}(z_0-p_z)\right] \quad (4)$$

若 $\beta\neq\pi/2$, 再于 $o'-x'y'z'$ 中取 $N'_1(1, 0, 0)$ 、

$N'_2(-1,0,0)$,其投影坐标为 $N_1(x_3, y_3, 0)$ 、 $N_2(x_4, y_4, 0)$,可推出

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{-z_0 \cos \theta_1}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + p_z - z_0} \\ y_3 &= -\frac{z_0 \sin \theta_1 \cos \theta_2}{\sin \theta_1 \sin \theta_2 + p_z - z_0} \\ y_4 &= \frac{z_0 \sin \theta_1 \cos \theta_2}{-\sin \theta_1 \sin \theta_2 + p_z - z_0} \end{aligned}$$

令 $k_2 = y_3/y_4$, 则 $\sin \theta_1 \sin \theta_2 = \frac{k_2 + 1}{k_2 - 1}(z_0 - p_z)$; 同理,

令 $k_3 = y_1/y_2$, 则 $\cos \theta_1 \sin \theta_2 = \frac{k_3 + 1}{k_3 - 1}(z_0 - p_z)$. 由此可计算出

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \arctan \frac{(k_2 + 1)(k_3 - 1)}{(k_2 - 1)(k_3 + 1)} \\ \theta_2 &= \arcsin \frac{(k_2 + 1)(z_0 - p_z)}{(k_2 - 1) \sin \theta_1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(2) 当 o' 、 o 、 P 不共线时, 设 o' 的投影坐标为 $o''(x_0, y_0, 0)$, 此时可推导出

$$p_x = k_4 x_0, \quad p_y = k_4 y_0, \quad k_4 = (z_0 - p_z)/z_0 \quad (6)$$

设 T' 为 $o'-x'y'z'$ 中的向量, 其投影为 T''_0 , 记 $T''_1 = T''_0 - s$, 则 T''_1 为 o' 、 o'' 、 P 调整为共线后的 T' 投影.

可利用上述 3 点共线时的算法计算出 θ_1 和 θ_2 , 对定理 1 和定理 2 的证明如下: 当 $\theta_2 = 0$ 时, 由 α 可知

$$\tan \alpha = y_3/x_3 = \tan \theta_1$$

若 o' 、 o 、 P 不在同一直线上时, 证明方法类似, 定理 1 得证. 对定理 2 的证明用矩阵变换, 在此从略.

3.3 实际对正系统方案的分析

在图 4 的控制流程中, 假设模具平面相对承片台平面偏移, 设 $z_0 = 100 \text{ mm}$, $p_z = 50 \text{ mm}$, 其他参数及仿真结果如表 2 所示.

在实际压印系统中, 采用的粗、精两级对正标记如图 5 所示. 粗对正要求达到精对正光栅栅距的一半, 即 $10 \mu\text{m}$ 的精度, 它主要取决于投影的 CCD 摄像精度, 在硬件中, CCD 摄像精度为 $1 \mu\text{m}$ 以下, 因此粗对正的精度完全可以达到要求.

表 2 仿真计算实例

	θ_1/rad	θ_2/rad	p_x/nm	p_y/nm
预设值	0.314	-6.28×10^{-4}	1.2×10^6	1.4×10^6
仿真值	0.314 159	$-6.283 18 \times 10^{-4}$	1.2×10^6	1.4×10^6
误差	10^{-6}	10^{-6}	10^{-1}	10^{-1}

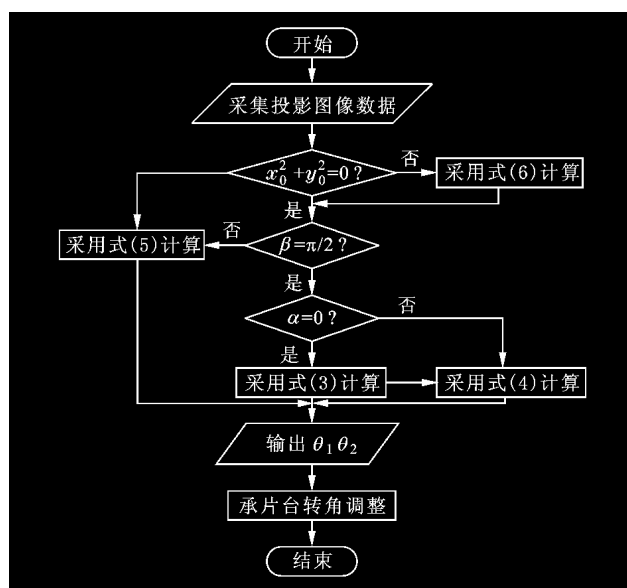


图 4 系统的粗对正控制流程图

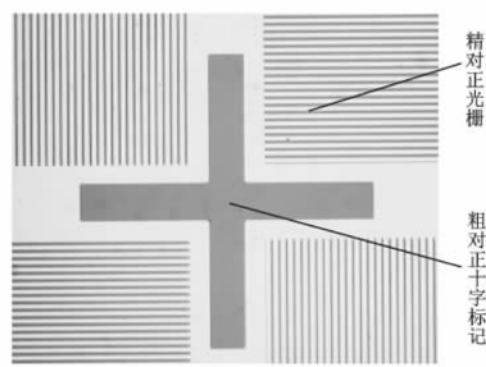


图 5 实际压印系统对正标记图

4 结 论

本文建立了点光源映射数学模型, 并对其进行了详细的分析与算法设计, 利用此模型对纳米压印光刻工艺中的模具与承片台的不平行度进行检测仿真, 设计出了控制流程图. 对模板标记在点光源下的投影进行仿真, 得出转角的计算误差在 10^{-6} rad 以下, 坐标偏移量的误差在 1 nm 以下. 因此, 利用此模型建立的粗对正系统的精度可达到 $1 \mu\text{m}$ 以下, 满足了压印光刻中下一步精对正系统的要求.

参考文献:

- [1] Stephen Y C, Chris K, Gu Jian. Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon [J]. Nature, 2002, 417(20): 835-837.
- [2] 刘红忠, 卢秉恒, 丁玉成, 等. 超高精度定位系统及线性补偿研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 277-280.

- Liu Hongzhong, Lu Bingheng, Ding Yucheng, et al. Study of ultra precision positioning system and linearity compensation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(3):277-280.
- [3] 刘红忠,丁玉成,李涤尘,等. 多维驱动器纳米定位系统的研究[J]. 信息与控制, 2002, 31(5):446-450.
- Liu Hongzhong, Ding Yucheng, Li Dicheng, et al. Submicro-positioning system based on multi-dimensional ultraprecise micro actuators [J]. Information and Control, 2002, 31(5):446-450.
- [4] 刘红忠,丁玉成,卢秉恒,等. 压印工作台的纳米级自找准定位研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 467-470.
- Liu Hongzhong, Ding Yucheng, Lu Bingheng, et al. Research on self-alignment and positioning for imprint stage in nanometer scale [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5):467-470.
- [5] Pahk H J, Lee D S, Park J H. Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation [J]. Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(1): 51-63.
- [6] Park S R, Yang S H. A mathematical approach for analyzing ultra precision positioning system with compliant mechanism [J]. Materials Processing Tech, 2005, 164-165: 1584-1589.
- [7] Rao G S, Ro P I. Submicrometer control of a traction drive using state feedback and estimation [J]. Precision Engineering, 1995, 17(2):124-130.
- (编辑 管咏梅)